

## پیاده‌سازی لولای الاستیک جهت انجام آزمایش سازه‌ای بر روی مدل یک شناور لاغر در حوضچه کشش

کریم اکبری وکیل‌آبادی<sup>۱</sup>، محمدرضا خدمتی<sup>۲</sup>، حبیب‌ا... سیاری<sup>۳</sup>

khedmati@aut.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- دانشیار دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- دانشیار دانشگاه عالی دفاع ملی

### چکیده

با افزایش تقاضا برای حمل و نقل سریع در دریا لازم است تا بتوان قیود مرتبط با سرعت پایین شناورها را مرتفع نمود. این تقاضا بیشتر در حوزه دفاعی و حمل مسافر می‌باشد که الزام به داشتن شناورهای تندرو تک بدنه یا چند بدنه را به دنبال خواهد داشت. با افزایش اندازه و سرعت شناورها، نیاز به توسعه دانش درک بارهای دینامیکی سازه‌ای و پاسخ‌های سازه می‌باشد. از اهم مواردی که طراحان علاقه مند به استخراج آن می‌باشند، ممان‌های خمشی و نیروهای برشی در امواج و نیروهای ناشی از کوبش می‌باشد. از جمله روش‌های موجود برای پیش‌بینی نیروهای موثر و پاسخ‌های سازه‌ای می‌توان به آزمایش شناور در مقیاس واقعی، روش‌های عددی و آزمایش مدل فیزیکی اشاره نمود. در آزمایش مدل از روش‌های هیدروالاستیک، ستون فقرات صلب و ستون فقرات انعطاف‌پذیر بهره گرفته می‌شود. در روش‌های ستون فقراتی، از یک تیر سرتاسری بر روی مدل استفاده می‌شود. چگونگی پیاده‌سازی تجهیزات اندازه‌گیری بر روی تیرهای صلب و انعطاف‌پذیر متفاوت از یکدیگر می‌باشد. در این پژوهش، مشخصات ابعادی لولاهای الاستیک بکار رفته در تیرهای انعطاف‌پذیر در مدل‌های مورد آزمایش استخراج شده و چگونگی پیاده‌سازی آنها برای انجام آزمایشات تشریح می‌شود.

واژگان کلیدی: تشابه سازه‌ای، آزمایش مدل، لولای الاستیک، ستون فقرات.

تاریخ دریافت مقاله : ۹۳/۰۷/۲۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۴/۰۸/۰۵

## ۱- مقدمه

امروزه از آزمایشهای مدل سه بعدی جهت اندازه گیری بارهای دینامیکی موج در مقیاس مدل، با شرایط موج کنترل شده، جهت ارزیابی بارهای سازه‌ای و پاسخهای ارتعاشی وایپینگ استفاده می شود. موسسات رده بندی برای پیش بینی بارهای سازه‌ای وارد بر شناور، به جای بهره گیری از تحلیل های آزمایشگاهی نیروهای موج القایی به شناور، از روابط استخراج شده بر اساس تجربیات برگرفته از شناورهای قبلی و نتایج تئوری های ساده شده، استفاده می کنند [۱]. غیرخطی بودن نیروی امواج و مشکلات برخاسته از پیامدهای آن الزام می دارد که برای معتبرسازی روش های عددی از روش های آزمایشگاهی بهره گرفته شود [۲].

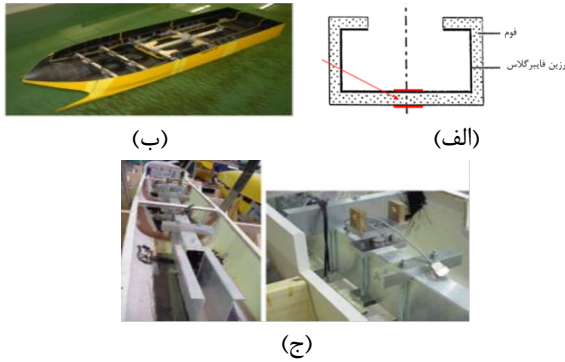
روش آزمایش مدل در مقیاس های کوچکتر یکی از شاخه های علم معماری کشتی است که مبتنی بر تحلیل ابعادی می باشد. در سال های اخیر از مدل هایی مناسب به منظور اندازه گیری پاسخ سازه ای شناور در شرایط مختلف عملیاتی، استفاده شده است. سابقه استفاده از مدل در معماری دریایی به کار آزمایشگاهی ویلیام فرود در سال ۱۸۷۴ میلادی برای تعیین مقاومت و دریامانی برمی گردد. برای برقراری شرایط تشابه بین مدل و شناور واقعی از دو روش تحلیل ابعادی و استفاده مستقیم از معادلات حاکم بهره گرفته میشود. کورکوت و همکارانش [۳] نیروها و گشتاورهای موثر بر مدل کاملاً الاستیک یک فروند شناور رو-رو را در حالت های سالم و آسیب دیده با کمک کرنش سنج های میله ای اندازه گیری نمودند. چان و همکاران [۴] بارهای عمومی موج وارد بر یک شناور رو-رو را به روش های تجربی و عددی به دست آورده و با هم مقایسه کردند. یاماموتو و همکارانش [۵] نیز از یک مدل الاستیک تجهیز شده به مجموعه ای از کرنش سنج ها برای اندازه گیری کرنش های منتجه استفاده نمودند. ناوار و همکارانش [۶] از مجموعه ای از یک مدل چندبخشی، یک سیستم اندازه گیری مناسب و تعدادی کرنش سنج برای استخراج نیروها و گشتاورهای اعمالی بر مدل استفاده نمودند. اینگودرومن [۶] در رساله دکتری خود، با استفاده از یک مدل چندبخشی مبادرت به استخراج نیروهای القایی از طرف موج بر بدنه شناور نمود و سپس، نتایج حاصل شده را با نتایج بدست آمده از محاسبات عددی انجام شده بر روی

شناور واقعی مقایسه کرد. جیسون لاوروف و همکارانش [۸] از یک مدل فریگیت چندبخشی به منظور استخراج نیروها و گشتاورها در طول بدنه شناور بهره بردند. چان و همکاران [۱۳] حرکات دامنه بلند و نیروهای ناشی از موج را بر روی یک کشتی رو-رو در امواج مورب در شرایط سالم و آسیب دیده مورد مطالعه قرار دادند.

بهره گیری از یک شناور باریک با پروفیل سینه شکافنده موج برای اولین بار در این مقاله به آن پرداخته شده است. نیروهای اعمالی بر اینگونه شناورها را نمی توان به کمک روابط ارائه شده توسط موسسات رده بندی استخراج نمود. بیشتر تحقیقات صورت گرفته بر روی شناورهای معمول می باشد. برای اینکه بتوان به کمک آزمایش مدل ممانهای اعمالی بر شناور را در شرایط مختلف جوی بدست آورد نیاز است که با بهره گیری از قوانین تشابه سازه ای و ساخت یک مدل مناسب (ستون فقراتی) نسبت به اندازه گیری اقدام نمود. مهمترین پارامتر نوع لولای الاستیک جهت اتصال بخشهای مختلف مدل به یکدیگر می باشد. در این مقاله، چگونگی استخراج مشخصات ابعادی لولاهای الاستیک بکاررفته در تیر انعطاف پذیر در یک مدل یک و نیم متری از یک شناور تک بدنه لاغر و همچنین، نحوه پیاده سازی آنها برای انجام آزمایشات به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲- مدل سازی شناور هدف

امروزه به واسطه ملاحظات اقتصادی، توسعه شناورهای تک بدنه برای راحتی خدمه، مسافری و تجهیزات برای کاربری های مختلف اعم از تجاری و غیرتجاری از اهداف طراحان شناورها محسوب می شود. برای اینکه بتوان کاهش مقاومت موج سازی و کاهش مقاومت متاثر از فرم هندسی بدنه را در طراحی بدنه لحاظ نمود، لازم است تا از شناورهای تک بدنه کاملاً باریک (لاغر) بهره گرفت. از منظر هیدرودینامیکی میتوان به شاخص هایی همچون عدم اسپری آب در ناحیه سینه شناور، ورود آرام سینه شناور در راستای عمودی به درون امواج، حداقل افت سرعت به علت جذب حداقل انرژی از موج، بهره گیری از هندسه تیز در جلوی شناور و عدم ایجاد ستون آب در جلوی شناور، دارا بودن خطوط هموارتر آب خور و خمیدگی بسیار کم در جلوی شناور که سبب فرو رفتن تدریجی در آب شده و در نتیجه کوبش کمتری را به دنبال خواهد داشت، اشاره نمود.



شکل (۱) روشهای ساخت مدل جهت آزمایشهای سازه‌ای (الف) مدل هیدروالاستیک، (ب) مدل ستون فقراتی انعطاف پذیر و (ج) مدل ستون فقراتی صلب [۸،۹،۱۰].

#### ۴- روش ستون فقراتی انعطاف پذیر

یکی از روش‌های اندازه‌گیری نیروها و ممان‌های اعمالی بر مدل شناور بهره‌گیری از روش ستون فقراتی انعطاف‌پذیر می‌باشد که توسط هرمانداستد ارائه گردید [۹]. در این روش مدل شناور به چند بخش کاملاً صلب تقسیم شده و سپس بخش‌های صلب به کمک کرنش‌سنج‌های مناسب به یکدیگر متصل می‌گردند. چنانچه مدل بهره‌گرفته شده بزرگ بوده و مشکل وزنی برای تعبیه کرنش‌سنج وجود نداشته باشد، آنگاه می‌توان در انتهای هر بخش صلب از مدل از یک فلنج استفاده نمود و سپس به کمک یک رابط تنظیم سختی و کرنش‌سنج، فلنج‌های انتهایی دو بخش صلب را به یکدیگر متصل کرد (شکل (۲)).

در بسیاری از موارد، مدل‌های به کار رفته محدودیت‌های وزنی دارند و باید حداقل وزن را برای تجهیز آن در نظر گرفت. به همین علت باید بتوان از روشی جدید برای این منظور بهره‌گیری که بهره‌گیری از لولای الاستیک است و همزمان دو بخش صلب را به یکدیگر متصل و از طرف دیگر به عنوان نیرو سنج عمل می‌نماید (شکل (۳)). البته برای استخراج ابعاد لولاهای الاستیک می‌بایست الزامات خاصی را در نظر گرفت. برای مدل شناور یک و نیم متری که در این مقاله به آن اشاره شده است، مشکلات وزنی جهت تجهیز آن وجود خواهد داشت و نمی‌توان از روشی که در شکل (۲) به آن اشاره شده است بهره‌گیری کرد. بدین جهت روش ارائه شده در شکل (۳) بهره‌گرفته خواهد شد. این مدل شناور به چهار بخش تقسیم می‌گردد.

مطالعه بر روی مدل‌ها به منظور جلوگیری از اشتباهات پرهزینه و برای دسترسی به اطلاعاتی که در طرح الگو کمک کننده است، انجام می‌پذیرد. از آنجاکه تغییر مشخصات ابعادی یک مدل در مقایسه با شناور واقعی نسبتاً کم هزینه‌تر می‌باشد، لذا می‌توان از نتایج آزمایشگاهی در طراحی استفاده نمود. آزمایش مدل علی‌رغم محدودیت‌های حاکم بر آن، در بسیاری از موارد، بی‌نهایت با ارزش بوده و استفاده از مدل‌ها در حل مسائل امروزی مهندسی رو به گسترش است. البته، این نکته را می‌بایست در نظر داشت که برقراری قواعد تشابه هندسی (ضریب مقیاس  $\lambda = \frac{L_s}{L_m}$ ) از دیدگاه‌های سینماتیکی و دینامیکی بین مدل و شناور واقعی الزامی می‌باشد. که در آن  $L_s$  و  $L_m$  به ترتیب معرف طول نمونه واقعی و طول مدل آزمایشگاهی می‌باشند.

#### ۳- روش‌های موجود برای مدل سازی

برای انجام آزمایش‌های هیدرودینامیکی، برقراری تشابه مکانیکی بین شناور واقعی و مدل مقیاس شده کفایت می‌کند. این در حالی است که برای انجام آزمایش‌های سازه‌ای نیاز است تا تشابه سازه‌ای بین شناور واقعی و مدل مقیاس شده با ظرافت خاصی برقرار گردد. برقراری کامل تشابه هندسی در آزمایش‌های سازه‌ای بسیار مشکل بوده و در برخی مواقع غیرممکن است. از این رو لازم است تا بایستی این مشکل به صورت نسبی برطرف گردد. برای ساخت مدل جهت انجام آزمایش‌های سازه‌ای با رعایت قوانین تشابه، سه روش وجود دارد که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود (شکل (۱)). قابلیت‌ها، معایب و مزایای هر یک از این روش‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

الف) مدل کاملاً الاستیک پیوسته<sup>۱</sup> (هیدروالاستیک) [۸].

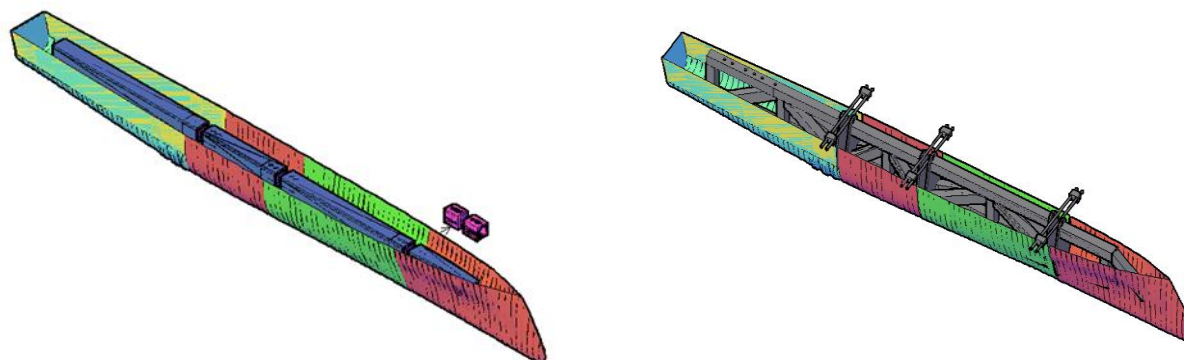
ب) مدل چند بخشی با فنرهای الاستیک مابین بخش‌های سخت<sup>۲</sup> (روش ستون فقراتی انعطاف‌پذیر) [۹].

ج) مدل ستون چند بخشی با ستون فقرات<sup>۳</sup> (روش ستون فقراتی صلب) [۱۰].

<sup>۱</sup> Fully Continuous Elastic Model

<sup>۲</sup> Segmented Model with Elastic Spring Between Stiff Section (Flexible Backbone)

<sup>۳</sup> Segmented Model with a Continuous Backbone (Rigid Backbone)

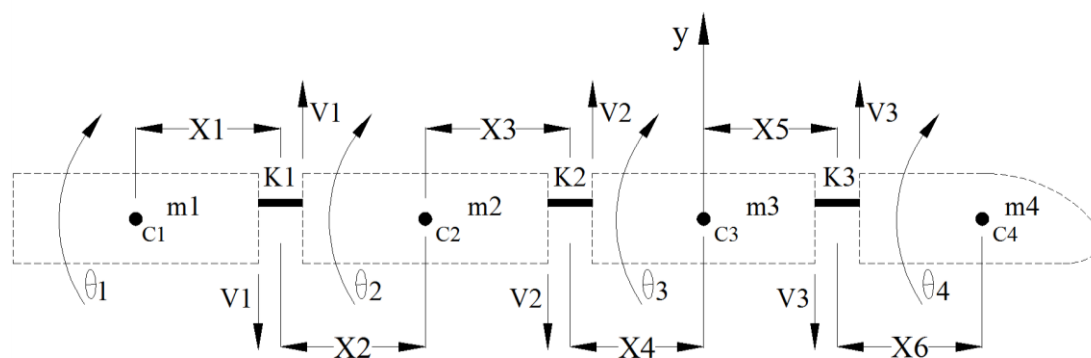


شکل (۲) مدل ستون فقراتی انعطاف پذیر با محورهای تنظیم سختی.

شکل (۳) مدل ستون فقراتی انعطاف پذیر با لولای الاستیک.

جدول (۱) مقایسه روش‌های ساخت مدل در انجام آزمایش‌های سازه‌ای [۵].

| محور                 | مدل هیدروالاستیک                             | مدل ستون فقراتی انعطاف پذیر                                 | مدل ستون فقراتی صلب   |
|----------------------|--|---|---|
| کمیت‌های اندازه‌گیری | - حرکات<br>- بارهای داخلی در مقاطع مختلف     | - حرکات<br>- پاسخ سازه‌ای عمومی گذرا و نیروی ناشی از موج    | - حرکات<br>- پاسخ سازه‌ای عمومی گذرا، نیروی ناشی از موج و نیروی محلی                                      |
| مزایا                | - ساخت آسان                                  | - ساخت نسبتاً آسان<br>- امکان مدل دینامیک‌های سازه‌ای عمومی | - امکان مدل دینامیک‌های سازه‌ای عمومی و محلی<br>- بارگذار بصورت مستقیم است<br>- بارگذاری بصورت پیوسته است |
| معایب                | - بارگذاری غیر مستقیم<br>- بارگذاری ناپیوسته | - بارگذاری غیر مستقیم<br>- بارگذاری ناپیوسته                | - مشکل بودن ساخت<br>- مشکل بودن نصب تجهیزات اندازه‌گیری   |



شکل (۴) دیاگرام سیستم جرم-فنر چهار درجه آزادی.

بخش دیگر متصل می‌گردد. این نوع لولاهای انعطاف‌پذیر رفتاری مشابه با فنرهای پیچشی دارند ((شکل (۴)). در حین کوبش، بخش‌های جلویی و عقبی بدنه بصورت چرخشی و عکس یکدیگر ارتعاش می‌کنند و متقابلاً سختی‌های چرخشی فنرهای پیچشی، اولین مود ارتعاشی طولی بدنه شناور را تولید می‌کنند.

لذا یک مدل تئوری چهار درجه آزادی را می‌توان برای آن تعریف کرده و سپس، سختی مورد نیاز برای لولای الاستیک را به کمک حل معادلات ارتعاشی استخراج نمود.

### ۵- مدل تئوری چهار درجه آزادی شناور

در این مطالعه، بدنه شناور به چهار بخش تقسیم می‌گردد که هر یک صلب بوده و به کمک لولایی انعطاف‌پذیر به

$$\begin{aligned} & (-m_1x_4 \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m} + m_1x_4x_2 - \\ & m_1x_4x_3 - m_2x_4 \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m} - \\ & m_2x_4x_3 + m_4x_5 \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m}) \ddot{\theta}_2 + \\ & (m_1x_4 \frac{m_1x_1}{m} - m_1x_4x_1 + m_2x_4 \frac{m_1x_1}{m} - \\ & m_4x_5 \frac{m_1x_1}{m}) \ddot{\theta}_1 + K_2(\theta_2 - \theta_3) + K_3(\theta_4 - \\ & \theta_3) = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (-I_4 + m_4x_6 \frac{m_4x_4}{m} - m_4x_6x_6) \ddot{\theta}_4 + \\ & (m_4x_6 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} + m_4x_6x_5) \ddot{\theta}_3 + \\ & (m_4x_6 \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m}) \ddot{\theta}_2 + \\ & (-m_4x_6 \frac{m_1x_1}{m}) \ddot{\theta}_1 - K_3(\theta_4 - \theta_3) = 0 \end{aligned} \quad (۱۴)$$

با توجه به مشخص بودن جرم و دیگر پارامترهای هندسی، رابطه  $\ddot{\theta}_i = -\omega_n^2 \theta_i$  را در معادلات فوق جایگذاری نموده و ماتریس زیر تشکیل می‌گردد:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = 0 \quad (۱۵)$$

هر یک از آرایه های ماتریس ارائه شده در معادله (15) را می توان بصورت زیر تعریف نمود:

$$\omega_n = \text{فرکانس طبیعی} \quad (a-۱۶)$$

$$a_{11} = \left( -m_1x_1 \frac{m_1x_1}{m} + m_1x_1x_1 + I_1 \right) \omega_n^2 - K_1 \quad (b-۱۶)$$

$$a_{12} = \left( m_1x_1 \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m} + m_1x_1x_3 - m_1x_1x_2 \right) \omega_n^2 + K_1 \quad (c-۱۶)$$

$$a_{13} = \left( m_1x_1x_4 + m_1x_1 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} \right) \omega_n^2 \quad (d-۱۶)$$

$$a_{14} = \left( m_1x_1 \frac{m_4x_4}{m} \right) \omega_n^2 \quad (e-۱۶)$$

$$a_{21} = a_{12} \quad (f-۱۶)$$

$$a_{31} = a_{13} \quad (g-۱۶)$$

$$a_{41} = a_{14} \quad (h-۱۶)$$

$$\begin{aligned} a_{22} = & \left( I_2 + m_1x_2 \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m} + \right. \\ & m_1x_2x_3 - m_1x_2x_2 + \\ & m_1x_3 \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m} + m_1x_3x_3 - \\ & m_1x_3x_2 + m_2x_3 \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m} + \\ & \left. m_2x_3x_3 \right) \omega_n^2 - (K_1 + K_2) \end{aligned} \quad (i-۱۶)$$

$$\begin{aligned} a_{23} = & \left( m_1x_2x_4 + m_1x_2 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} + \right. \\ & m_1x_3 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} + m_1x_3x_4 + \\ & \left. m_2x_3 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} - m_2x_3x_4 \right) \omega_n^2 + \\ & K_2 \end{aligned} \quad (j-۱۶)$$

معادلات حرکت برای سیستم جرم-فنر چهار درجه آزادی را می توان بصورت زیر نوشت. تعادل نیروی عمودی هر بخش مستلزم اعمال روابط زیر است:

$$m_1(\ddot{y} + x_1\ddot{\theta}_1 + x_2\ddot{\theta}_2 + x_3\ddot{\theta}_2 + x_4\ddot{\theta}_3) = -V_1 \quad (۱)$$

$$m_2[\ddot{y} + x_3\ddot{\theta}_2 + x_4\ddot{\theta}_3] = V_1 - V_2 \quad (۲)$$

$$m_3\ddot{y} = V_2 - V_3 \quad (۳)$$

$$m_4(\ddot{y} - x_6\ddot{\theta}_4 - x_5\ddot{\theta}_3) = V_3 \quad (۴)$$

$$V_1x_1 - K_1(\theta_1 - \theta_2) = I_1\ddot{\theta}_1 \quad (۵)$$

$$K_1(\theta_1 - \theta_2) - K_2(\theta_2 - \theta_3) + V_1x_2 + V_2x_3 = I_2\ddot{\theta}_2 \quad (۶)$$

$$K_2(\theta_2 - \theta_3) - K_3(\theta_3 - \theta_4) + V_2x_4 + V_3x_5 = I_3\ddot{\theta}_3 \quad (۷)$$

$$V_3x_6 - K_3(\theta_4 - \theta_3) = I_4\ddot{\theta}_4 \quad (۸)$$

با جایگذاری معادله (۱) در معادله (۲) مقدار  $V_2$  بدست می آید:

$$V_2 = m_1(\ddot{y} + x_1\ddot{\theta}_1 - x_2\ddot{\theta}_2 + x_3\ddot{\theta}_2 + x_4\ddot{\theta}_3) - m_2[\ddot{y} + x_3\ddot{\theta}_2 - x_4\ddot{\theta}_3] \quad (۹)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} = & \frac{-m_1x_1\ddot{\theta}_1 - (m_1x_2 + m_1x_3 + m_2x_3)\ddot{\theta}_2 - \\ & (m_1x_4 + m_2x_4 - m_4x_5)\ddot{\theta}_3 + m_4x_6\ddot{\theta}_4}{m} \end{aligned} \quad (۱۰)$$

با جایگذاری معادله (۴) و (۹) در معادله (۳) مقدار  $\ddot{y}$  بدست می آید و با حذف  $\ddot{y}$  از (۶)، (۷) و (۸) می توان نوشت:

$$\begin{aligned} & \left( -m_1x_1 \frac{m_4x_4}{m} \right) \ddot{\theta}_4 + \\ & \left( -m_1x_1x_4 - m_1x_1 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} \right) \ddot{\theta}_3 + \\ & \left( -m_1x_1 \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m} - m_1x_1x_3 + \right. \\ & \left. m_1x_1x_2 \right) \ddot{\theta}_2 + \left( m_1x_1 \frac{m_1x_1}{m} - m_1x_1x_1 - I_1 \right) \ddot{\theta}_1 - \\ & K_1(\theta_1 - \theta_2) = 0 \end{aligned} \quad (۱۱)$$

$$\begin{aligned} & -m_1x_2 \left( \frac{m_4x_4}{m} \ddot{\theta}_4 + \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} \ddot{\theta}_3 + \right. \\ & \left. \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m} \ddot{\theta}_2 - \frac{m_1x_1}{m} \ddot{\theta}_1 + x_1\ddot{\theta}_1 - \right. \\ & \left. x_2\ddot{\theta}_2 + x_3\ddot{\theta}_2 + x_4\ddot{\theta}_3 \right) - m_1x_3 \left( \frac{m_4x_4}{m} \ddot{\theta}_4 + \right. \\ & \left. \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} \ddot{\theta}_3 + \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m} \ddot{\theta}_2 - \right. \\ & \left. \frac{m_1x_1}{m} \ddot{\theta}_1 + x_1\ddot{\theta}_1 - x_2\ddot{\theta}_2 + x_3\ddot{\theta}_2 + x_4\ddot{\theta}_3 \right) - \\ & m_2x_3 \left( \frac{m_4x_4}{m} \ddot{\theta}_4 + \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} \ddot{\theta}_3 + \right. \\ & \left. \frac{m_1x_2 - m_1x_3 - m_2x_3}{m} \ddot{\theta}_2 - \frac{m_1x_1}{m} \ddot{\theta}_1 + x_3\ddot{\theta}_2 - \right. \\ & \left. x_4\ddot{\theta}_3 \right) + K_1(\theta_1 - \theta_2) - K_2(\theta_2 - \theta_3) = I_2\ddot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (۱۲)$$

$$\begin{aligned} & \left( -m_1x_4 \frac{m_4x_4}{m} - m_2x_4 \frac{m_4x_4}{m} + m_4x_5 \frac{m_4x_4}{m} - \right. \\ & \left. m_4x_5x_6 \right) \ddot{\theta}_4 + (-I_3 - \\ & m_1x_4 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} - m_1x_4x_4 - \\ & m_2x_4 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} + m_2x_4x_4 + \\ & \left. m_4x_5 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} + m_4x_5x_5 \right) \ddot{\theta}_3 + \end{aligned} \quad (۱۳)$$

سختی هیدرواستاتیک از رابطه (۱۸) بدست آمده است:

$$k = \rho g \int_0^x B(x)x^2 dx \quad (18)$$

$B(x)$ : عرض صفحه آبخور محلی

$\rho$ : چگالی سیال

فرکانس طبیعی مدل با صفر قرار دادن دترمینان ماتریس معادله (۱۴) و در نظر گرفتن مقادیر ارائه شده در جدول (۲)، بدست می آید.

$$\det(A) = 10^9(4.152\omega^8 + 616\omega^6 + 3200\omega^4 - 3.72 * 10^5\omega^2) \quad (19)$$

$$4.152\omega^8 + 616\omega^6 + 3200\omega^4 - 3.72 * 10^5\omega^2 = 0 \quad (20)$$

از شکل (۵) می توان مقدار فرکانس طبیعی مدل چهار درجه آزادی را برابر با ۴٫۶۱ هرتز بدست آورد.

### ۵-۱- طراحی لولای الاستیک مناسب

برای انجام آزمایشات مدل چند بخشی هیدرواستاتیک، دو قید بسیار مهم برای استخراج مشخصات ابعادی لولای الاستیک وجود دارد:

۱- ممان خمشی: مقدار ممان حداکثر اعمالی بر هر یک از مقاطع با بهره گیری از ضریب مقیاس، از شناور واقعی به مدل انتقال داده می شود. با استفاده از قوانین تشابه می توان ارتباط بین ممان و سختی خمشی در شناور واقعی و مدل را مطابق رابطه (۲۱ و ۲۲) بیان نمود [۱۱].

$$[EI]_M = \frac{1}{\lambda^5} [EI]_s \quad (21)$$

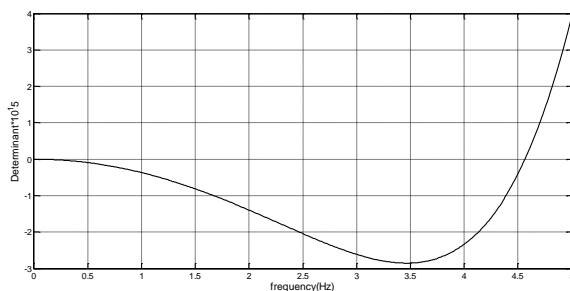
$$M_m = M_s \left(\frac{1}{\lambda}\right)^4 \quad (22)$$

$E$ : مدول الاستیسیته بر حسب  $N/m^2$

$I$ : ممان اینرسی

$M$ : گشتاور خمشی

$\lambda$ : ضریب مقیاس



شکل (۵) دترمینان ماتریس ۴ درجه آزادی سیستم جرم-فنر برای تعیین اولین فرکانس مودال طولی مدل شناور ۱٫۵ متری.

$$a_{24} = \left(m_1x_2 \frac{m_4x_4}{m} + m_1x_3 \frac{m_4x_4}{m} + m_2x_3 \frac{m_4x_4}{m}\right) \omega_n^2 \quad (k-16)$$

$$a_{32} = a_{23} \quad (l-16)$$

$$a_{42} = a_{24} \quad (m-16)$$

$$a_{33} = \left(I_3 + m_1x_4 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} + m_1x_4x_4 + m_2x_4 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} - m_2x_4x_4 - m_4x_5 \frac{m_2x_4 - m_4x_5 - m_1x_4}{m} - m_4x_5x_5\right) \omega_n^2 - (K_2 + K_3) \quad (n-16)$$

$$a_{34} = \left(m_1x_4 \frac{m_4x_4}{m} + m_2x_4 \frac{m_4x_4}{m} - m_4x_5 \frac{m_4x_4}{m} + m_4x_5x_6\right) \omega_n^2 + K_3 \quad (o-16)$$

$$a_{43} = a_{34} \quad (p-16)$$

$$a_{44} = \left(I_4 - m_4x_6 \frac{m_4x_4}{m} + m_4x_6x_6\right) \omega_n^2 - K_3 \quad (q-16)$$

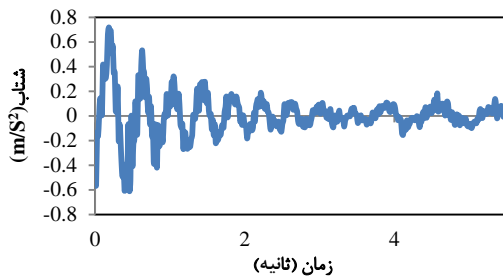
مقدار فرکانس طبیعی در دستگاه معادلات (۱۵) مجهول بوده که پس از حل دستگاه مقدار فرکانس طبیعی، بدست خواهد آمد. برای محاسبه مقدار پاسخ فرکانس خیس در سیستم چهار درجه آزادی، از تقریب جرم افزوده استفاده شده است. برای محاسبه جرم افزوده از تقریب جرم نیم دایره استفاده شده است بگونه ای که قطر دایره با عرض خط آبخور در هر مقطع در طول شناور برابر می باشد. ممان اینرسی جرمی حول مرکز شناوری برای هر بخش از بدنه با انتگرال گیری بر روی طول بدنه شناور مطابق رابطه زیر بدست می آید:

$$I = \int_L \left(\frac{dm}{dx}\right) x^2 dx \quad (17)$$

با استفاده از سختی اندازه گرفته شده و سختی هیدرواستاتیک ناشی از سیال اطراف بدنه، می توان سختی فنر پیچشی بکار رفته در اتصال بخشهای مختلف بدنه به یکدیگر را بدست آورد. سختی هیدرواستاتیک بر این فرض استوار است که هر بخش از بدنه بصورت آزادانه در صفحه عمودی حول مرکز صفحه آبخور حرکت پیچ می نماید.

جدول (۲) پارامترهای فیزیکی بکار رفته در مدل.

| پارامتر | مقدار | پارامتر | مقدار    | پارامتر | مقدار                  |
|---------|-------|---------|----------|---------|------------------------|
| x1      | 260   | m1      | 1000 gr  | K3      | 3000 N/m               |
| x2      | 120   | m2      | 1000 gr  | I1      | 0.35 Kg.m <sup>2</sup> |
| x3      | 130   | m3      | 1350 gr  | I2      | 0.1 Kg.m <sup>2</sup>  |
| x4      | 160   | m4      | 1000 gr  | I3      | 0.5 Kg.m <sup>2</sup>  |
| x5      | 140   | K1      | 3000 N/m | I4      | 0.3 Kg.m <sup>2</sup>  |
| x6      | 140   | K2      | 3000 N/m |         |                        |



شکل (۶) انتقال شتاب اندازه گیری شده در حوزه زمان.

هر چند که در ساخت بدنه مدل از مواد سبک (فایبرگلاس) بهره گرفته خواهد شد ولی مهمترین فاکتور در آزمایشات کاهش وزن لولا می باشد. از آلومینیوم سری ۵۰۸۳ در ساخت بهره گرفته شده است. برای ساخت لولای الاستیک از پروفیل قوطی با مشخصات 32x32x1.5 استفاده شده و محل پیچهای بکار رفته در شکل نشان داده شده است. طول لولای الاستیک ( $l_b$ ) به عنوان تابعی مستقیم از سختی لولای الاستیک بوده و ضریب سختی لولای الاستیک را می توان بکمک رابطه (۲۴) بدست آورد:

$$K_{th} = \frac{M}{\theta} = \frac{EI}{l_b} \quad (24)$$

$K_{th}$  سختی تئوری لولای الاستیک،  $M$  گشتاور اعمالی،  $\theta$  چرخش زاویه ای تیر،  $E$  مدول الاستیسیته مواد و  $I$  گشتاور دوم سطح مقطع عرضی تیر می باشد. برای بررسی اثرات استحکام نهایی و سختی در اثر کاهش ضخامت دیواره و وزن لولای الاستیک، آزمایشات خمشی بر روی لولای الاستیک با ضخامت دیواره متفاوت صورت پذیرفته است. چهار عدد لولای الاستیک نمونه با سختی برابر با 3000 نیوتن متر/رادیان و ضخامتهای ۴، ۸، ۱۲ و ۱۵ میلیمتر ساخته شد. با استفاده از دستگاه خمش در آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر لولاهای ساخته شده تحت آزمایش خمش قرار گرفتند (شکل ۷). مشاهده گردید که با افزایش در ضخامت دیواره لولا، استحکام نهایی افزایش می یابد و از طرفی ضریب اطمینان لولای الاستیک نیز افزایش می یابد. در شکل (۸) رابطه نیرو و خیز برای نمونه های مورد آزمایش ارائه شده است.

از مهمترین مواردی که در حین انجام آزمایشات در حوضچه کشش مد نظر می باشد اینست که لولای الاستیک که به عنوان نیرو سنج استفاده می شود دارای استحکام کافی در مقابل نیروی وزن در هنگام جابجایی

۲- فرکانس مودال: برای اینکه بتوان متناسب با شناور واقعی به یک انعطاف پذیری مناسبی در مدل هیدروالاستیک چند بخشی رسید باید از تشابه فرکانس مودال مطابق رابطه (۲۳) استفاده کرد.

$$\omega_m = \omega_s \sqrt{\frac{L_s}{L_m}} = \omega_s \sqrt{\lambda} \quad \omega_s \text{ فرکانس:} \quad (23)$$

همانطوریکه از قبود پیش گفته بر می آید چنانچه در ساخت مدل هیدروالاستیک چند بخشی، فقط به تشابه ممان خمشی توجه شود احتمال عدم دستیابی به انعطاف پذیری مورد نظر در مدل وجود دارد لذا بایستی در ساخت مدل هیدروالاستیک به سختی لولای الاستیک جهت اتصال بخشهای مختلف به یکدیگر توجه کافی شود. بنابراین ابتدا مقدار ممان خمشی ماکزیمم شناور واقعی در هدینگ بحرانی تخمین زده می شود، سپس بکمک روابط (۲۱، ۲۲) و (۲۳) به مدل انتقال داده می شود.

برای اینکه بتوان بکمک آزمایش مدل مقدار فرکانس مودال را اندازه گیری نمود ابتدا مدل را در شرایط بالاست و تریب مبتنی بر شناور واقعی در حوضچه قرار داده شده و سپس با اعمال یک ضربه در جلوی مدل، مدل را به حرکت اجباری پیچ واداشته می شود. با استفاده از شتاب سنج، نمودار شتاب در حوزه زمان ترسیم و بکمک تبدیل فوریه به حوزه فرکانس انتقال داده می شود (شکل ۵).

به کمک اندازه گیری و حل معادلات می توان مقدار فرکانس مودل اولیه را پیدا نمود که بایستی با یکدیگر همخوانی داشته باشند. چنانچه مقادیر بدست آمده تفاوت داشته باشد بایستی ابعاد لولای الاستیک تغییر داده شده و مجدداً آزمایش را تکرار تا به انعطاف پذیری متناسب با شناور واقعی دست پیدا نمود.

## ۲-۵- طراحی لولای انعطاف پذیر

از محدودیت های اصلی در ساخت مدل شناور هدف جهت آزمایشات سازه ای، وزن نهایی مدل می باشد که سعی گردید از لولایی با حداقل وزن که دارای سختی مناسب برای داشتن انعطاف پذیری کافی باشد استفاده شود. به همین منظور از لولاهای الاستیک مطابق شکل (۶) بهره گرفته شد که جهت رسیدن به خواسته های مورد انتظار دارای ضخامت های متفاوت می باشد. برای تعیین پارامترهای تاثیر گذار بر سختی و استحکام کلی، یک سری آزمایشات بر روی لولای الاستیک انجام گرفت.

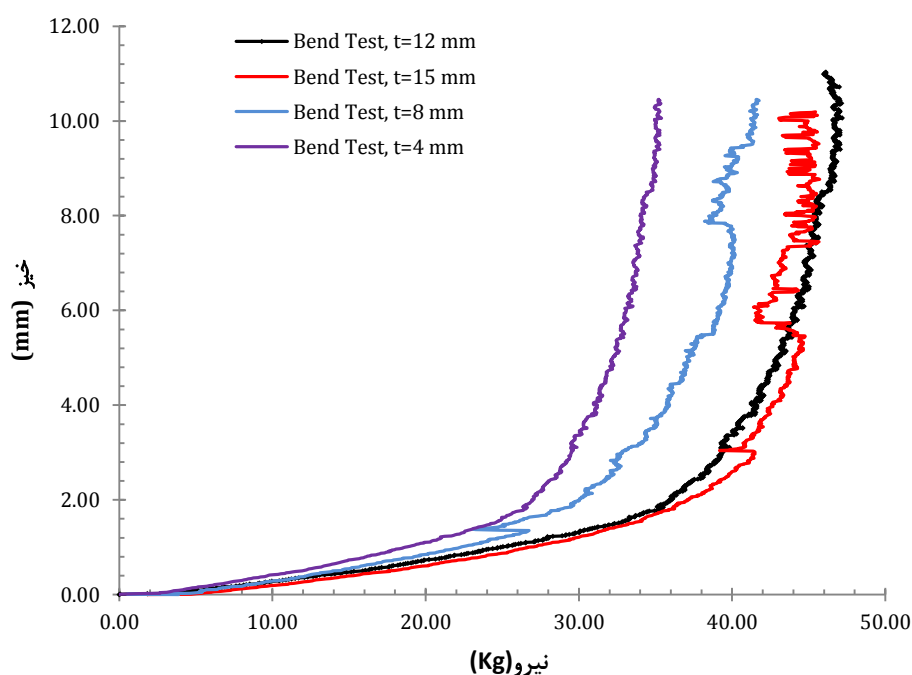
### ۳-۵ پیاده سازی لولای الاستیک در مدل مورد آزمایش

برای انجام آزمایشات سازه‌ای در مدل شناور بایستی بتوان مطابق روشهای پیش گفته، لولای انعطاف پذیر را در شناور جایگذاری نمود. پس از آماده سازی مدل و نصب ستون فقرات در داخل آن می بایستی درجات آزادی لولای الاستیک را کنترل نمود.

مدل و دیگر نیروهای اعمالی در هنگام آزمایش را داشته باشد. بنابراین هر چند که ضخامت ۴ میلیمتر دارای وزن کمتری می باشد ولی مطابق شکل ۹(الف) مشاهده می گردد که دچار شکست گردیده است. لذا با مقایسه نمونه‌های ساخته شده و انجام آزمایشات خمش بر روی آنها و در نظر گرفتن ضریب اطمینان مناسب، لولای با ضخامت ۸ میلیمتر به عنوان لولای الاستیک دلخواه انتخاب گردید. این لولا علاوه بر استحکام کافی دارای انعطاف پذیری مناسب نیز است.

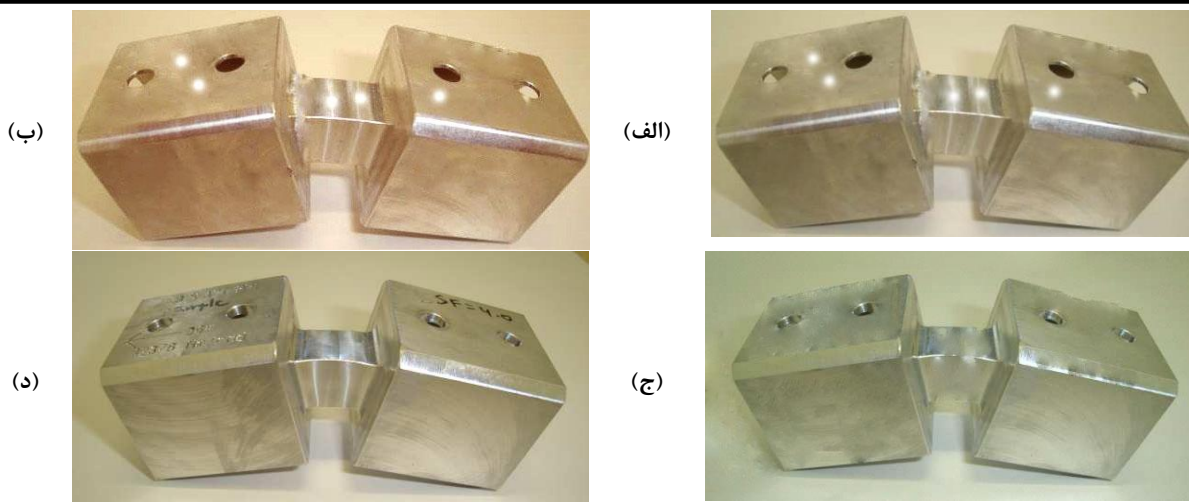


شکل (۷) مکانیزم در نظر گرفته شده برای آزمایش لولای الاستیک.



شکل (۸) رابطه مقدار خیز (میلیمتر) با نیرو (کیلوگرم) برای لولای الاستیک با ضخامت های ۴، ۸، ۱۲ و ۱۵ میلیمتر.





شکل (۹) مکانیزم شکست لولای الاستیک 3000 Nm/rad به عنوان تابعی از ضخامت دیواره برای ضخامت‌های ۴، ۸، ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر.

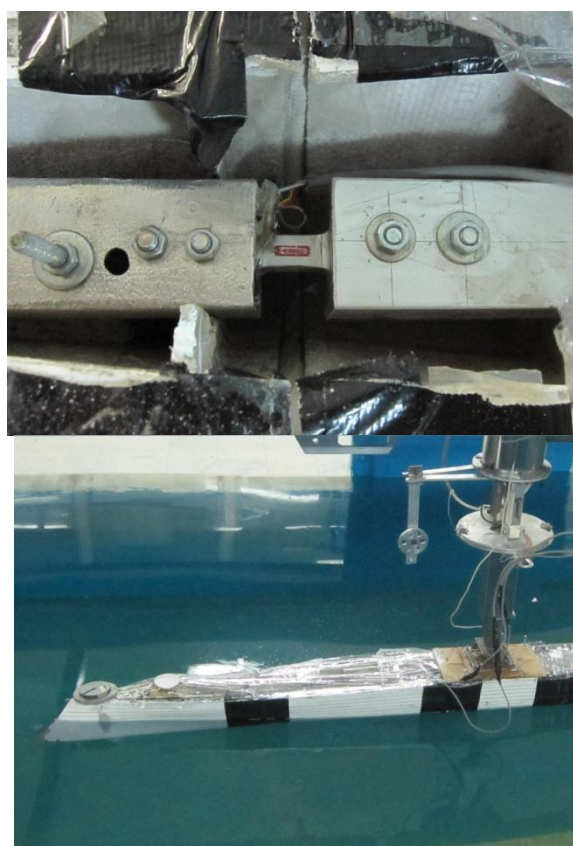
ستون فقرات) و لولای چهار ضلعی مناسب به عنوان رابط بخش‌های مختلف بدنه و بستر نیرو سنج می باشد. در این مقاله فرایند استخراج مشخصات ابعادی لولای الاستیک برای یک مدل شناور تک بدنه تندرو جایجایی مورد مطالعه قرار گرفت.

با استفاده از یک سری قیود این عمل انجام گرفت. هدف اصلی در طراحی و ساخت لولای الاستیک، تولید نیروسنج مناسب جهت یک مدل شناور خاص می باشد که با توجه به مشخصات هندسی و نوع مواد بکار رفته در ساخت شناور واقعی این نیروسنج متفاوت خواهد بود. ولی می توان اذعان داشت که فرایند طراحی و انتخاب می تواند یکسان باشد. پس از نصب کرنش سنج بر روی لولای الاستیک، نیروسنج تولید و در مدل شناور نصب گردید. نیروسنج بدست آمده شرایط انعطاف پذیری مناسب و استحکام را ارضا نموده است (شکل ۹)

بر همین اساس لاوروف و همکاران [۸] از یک لولای الاستیک برای استفاده در انجام آزمایشات بهره گرفتند. نتایج بدست آمده در حوزه خطی تناسب خوبی با اندازه گیریهای انجام گرفته در این تحقیق دارد (شکل ۱۰)

#### ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

جهت پیش بینی پاسخ سازه‌ای شناورهای جدید و معتبرسازی روشهای عددی نیاز است که آزمایش سازه‌ای بر روی مدل صورت پذیرد. سه روش مختلف برای آزمایش مدل وجود دارد که اخیراً به مدل با ستون فقرات انعطاف‌پذیر توجه ویژه‌ای شده است. مهمترین عامل در بکارگیری این روش چگونگی استخراج مشخصات ابعادی لولای الاستیک می باشد. لولای الاستیک بایستی علاوه بر داشتن استحکام کافی متناسب با شناور واقعی از انعطاف پذیری معادل با شناور واقعی برخوردار باشد. ساده ترین راه حل برای تجهیز مدل، استفاده از پروفیل قوطی (به عنوان



شکل (۱۰) نیروسنج تولید شده از لولای الاستیک و بکار رفته در مدل شناور جهت انجام تست سازه‌ای.

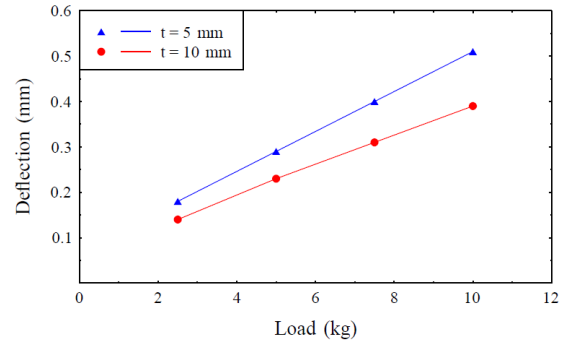
خمش بر روی لولاهای الاستیک، کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

### فهرست علائم:

|            |   |          |                            |
|------------|---|----------|----------------------------|
| $C_1$      | مرکز جرم بخش عقبی (بخش اول)                 | $\theta$ | زاویه پیچش                 |
| $C_2$      | مرکز جرم بخش دوم                            | $\omega$ | فرکانس                     |
| $C_3$      | مرکز جرم بخش سوم                            | $m$      | جرم کل بدنه                |
| $C_4$      | مرکز جرم بخش جلویی (بخش چهارم)              | $m_1$    | جرم بخش بخش عقبی (بخش اول) |
| $x_1$      | فاصله فنر پیچشی عقبی تا مرکز جرم بخش عقبی   | $m_2$    | جرم بخش دوم                |
| $x_2$      | فاصله فنر پیچشی میانی تا مرکز جرم بخش عقبی  | $m_3$    | جرم بخش سوم                |
| $x_3$      | فاصله فنر پیچشی میانی تا مرکز جرم بخش میانی | $m_4$    | جرم بخش جلویی (بخش چهارم)  |
| $E$        | مدول الاستیسیته، $N/m^2$                    | $K_1$    | سختی فنر پیچشی عقبی        |
| $\omega_n$ | فرکانس طبیعی                                | $K_2$    | سختی فنر پیچشی میانی       |
| $EI$       | ضریب صلبیت خمشی                             | $K_3$    | سختی فنر پیچشی جلویی       |
| $K_t$      | سختی تئوری لولای الاستیک                    | $V$      | نیروی برشی                 |
| $h$        | الاستیک                                     | $m$      | زیر نویس مدل کشتی          |
| $g$        | شتاب گرانش                                  |          |                            |
| $s$        | زیرنویس کشتی واقعی                          |          |                            |

### ۷- مراجع

- [1] Thomas, G., Davis, M.R., Holloway D. S. and Roberts T. J., "Transient Dynamic Slam Response of Large High-speed Catamarans", 7<sup>th</sup> International Conference on Fast Sea Transportation, pp.1-5, 2011.
- [3] Davis, M. R., Holloway D.S. and Watson N.L., "Validation of non-linear Wave Loads Predicted by Time Domain Method in Sea Trials of an 86m Catamaran", 8th International Conference on Fast Sea Transportation, FAST '05, pp. 1-4, 2005.
- [3] Korkut, E., Atlar, M. and Incecik, A., "An Experimental Study of Global Loads Acting on an Intact and Damaged Ro-Ro Ship Model", Ocean Engineering, Vol. 32, pp. 1370-1403, 2005.
- [4] Chan, H. S., Atlar, M. and Incecik, A., "Global Wave Loads on Intact and Damaged Ro-Ro Ships in Regular Oblique Waves", Marine Structures, Vol. 16, pp. 323-344, 2003.



شکل (۱۱) خیز به عنوان تابعی از بار اعمالی بر روی یک لولای الاستیک با سختی ۱۴۸۵۴ نیوتن متر بر رادیان برای دو ضخامت ۵ و ۱۰ میلی‌متر [۸].

پس از انجام آزمون‌های سازه‌ای و بر اساس انعطاف پذیری مدل شناور چند بخشی هیدروالاستیک لولای الاستیک با ضخامت ۴ میلی‌متر به عنوان انتخاب نهایی برگزیده شد. این لولای علاوه بر سختی مناسب، انعطاف پذیری مناسبی را برای مدل ساخته شده در انجام آزمایشات را فراهم می‌آورد. با توجه به محدودیت‌های وزنی بایستی بتوان نیروسنج‌های مناسبی جهت تست سازه‌ای استفاده نمود. شناور مورد آزمایش یک شناور جدید می‌باشد که بطور قطعی نمی‌توان از قوانین ارائه شده در موسسات رده بندی برای محاسبه بارهای اعمالی بر آن بهره گرفت. لذا الزام می‌بایستی یک لولای مناسب جهت تولید نیروسنج، که کلیه شرایط تشابه را ارضاء نماید طراحی و ساخته شود. اینگو دراممن [۷] با توجه به بزرگ بودن مدل از یک لولای متفاوت بهره گرفته است ولی با توجه به شرایط آزمایشگاهی، در این تحقیق می‌بایستی از مدل کوچک استفاده نمود که الزام می‌بایستی از لولای واحدی که بتواند جوابگوی آزمایشات باشد استفاده می‌شد. روش و نتایج بدست آمده با منبع ۸ همخوانی مناسبی دارد.

### ۷- تشکر و قدردانی

نویسندگان کمال تشکر و قدردانی را از ریاست محترم سازمان تحقیقات و جهاد خودکفایی نداجا و مسئول محترم کارگاه جهت ساخت لولاهای الاستیک اعلام می‌دارند. همچنین، از آقای دکتر علیزاده و قاصلو، مسئول محترم آزمایشگاه مقاومت مصالح دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر، در خصوص انجام آزمایش‌های

- [5] Yamamoto, Y., Fujino, M. and Fukasawa, T., "Motions and Longitudinal Strength of a Ship in Head Sea and Effects of Non-Linearities", J. Soc Nav. Archit. Jpn, Vol. 13, pp.144-205, 1979.
- [6] Nawwar, A. M., Godon, A., Root, T., Howard, D. and Bayly, I. M., "Development of a Measuring System for Segmented Ship Model", 1989.
- [7] Ingo, D., "Experimental and Numerical Investigation of Nonlinear Wave-Induced Load Effects in Containerships Considering Hydroelasticity", Norwegian University of Science and Technology Faculty of Engineering Science and Technology Department of Marine Technology, PhD Thesis, 2008.
- [8] Jason, L.; Michael, R. D.; Damien, S. H. and Thomas, G., "Experimental Analysis Of The Wet Flexural Mode Response Of An Npl 6a Hydroelastic Segmented Model", University of Tasmania, Hobart, Tasmania, Australia, 5<sup>th</sup> International Conference on High Performance Marine Vehicles, pp. 8-10, Nov. 2006.
- [9] Aarsnes, J., "Experimental Techniques for Local and Global Hydroelastic Effects on Ships, in 'Seminar on Hydroelasticity in Marin Technology'", Trondheim, Norway, 1996.
- [10] Hermundstad, O., "Theoretical and Experimental Hydroelastic Analysis of High Speed Vessels", PhD thesis, The Norwegian University of Science and Technology, 1995.
- [11] Keuning, J., "Distribution of Damping and Added Mass Along the Length of a Ship Model Moving at High Forward Speed", International Shipbuilding Progress, Vol. 37, No. 41, pp. 123-150, 1990.
- [12] ITTC.sname.org/CD%202011/.../7.5-02-05-04
- [13] Chan, H. S., "Prediction of Large Amplitude Motions, Wave Loads on a Ro-Ro Ship in Regular Obliquewaves in Intact and Damage Conditions", DTR-4.1-NEW-12.98, DEXTREMEL project BE97-4375, 1998.